



## IZ SVIJETA ZNANOSTI

## Higgsova čarolija i Nobelova nagrada za Fiziku 2013. g.

Ivica Picek<sup>1</sup>

Nobelovu nagradu iz fizike za 2013. godinu [1] dijele François Englert, professor emeritus sa Sveučilišta u Bruxellesu i Peter W. Higgs professor emeritus sa Sveučilišta u Edinburghu “za teorijsko otkriće mehanizma koji doprinosi našem razumijevanju porijekla masa subatomske čestice, a koji je nedavno potvrđen otkrićem predviđene fundamentalne čestice u eksperimentima ATLAS i CMS na CERN-ovom velikom hadronskom sudarivaču LHC-u.

## Otvaranje pitanja porijekla masa elementarnih čestica

CERN-ov veliki hadronski sudarivač LHC omogućio je da “zagrebemo” po Higgsovom polju koje prožima prostor u koji smo uronjeni i da pobudimo česticu koju do sada nismo mogli osjetiti. Samo Higgsovo polje uvedeno je u fiziku u pokušaju da se objasni porijeklo masa temeljnih čestica, pri čemu predviđa postojanje nove temeljne čestice, *higgsa*. Otkrićem Higgsove čestice kao prve temeljne čestice bez spina zaokružena je “periodična tablica” standardnog modela temeljnih čestica i sila prikazana na slici. Prva tri stupca na slici prikazuju tri generacije od ukupno 12 čestica tvari (gdje upadaju u oči bezmaseni neutrini), dok se četvrti stupac sastoji od 12 čestica prijenosnika sila (s 8 bezmasenih gluona koji prenose jaku kromodinamičku silu i bezmasenog fotona koji prenosi elektrodinamičku silu).

tri generacije materije (fermiona) spin 1/2

	I	II	III	
mass –	2.4 MeV	1.27 GeV	173.2 GeV	0
charge –	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
name –	u Left up Right	c Left charm Right	t Left top Right	g gluon
Quarks	d Left down Right	s Left strange Right	b Left bottom Right	$\gamma$ photon
	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	0	0	0	0
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	Z weak force
	0	0	0	126 GeV
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	0
	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	H Higgs boson
				spin 0
				W weak force
				spin 1

Svijet tvari koja nas okružuje građen je čisto od kvarkova i leptona prve generacije. Pritom *u* i *d* kvarkovi vezani gluonima izgrađuju protone i neutrone, sastavnice atomskih jezgri, a one pak upotpunjene elektronima grade atome. Za upotpunjavanje tablice na slici trebao je raspon od 1897. godine, kada je J. J. Thomson u katodnom zračenju otkrio elektron kao prvu elementarnu česticu (1800 puta lakšu od protona), do 1994. godine kada su u sudarima protona i antiprotona na tevatronu kod Chicaga

<sup>1</sup> Autor je redoviti profesor na Zavodu za teorijsku fiziku čestica i polja, Fizički odsjek PMF-a Sveučilišta u Zagrebu, e-pošta: [picek@phy.hr](mailto:picek@phy.hr)

proizvedeni  $t$ -kvarkovi (180 puta masivniji od protona). U današnjem razumijevanju, moderni sudarivači stvaraju elementarne čestice kao pobuđenja pridruženog polja koje prožima cijeli prostor. Novostvorene teške čestice brzo se raspadaju na lakše, no elektron kao najlakši je stabilan jer se nema na što raspasti. Da bi se potvrdilo postojanje Higgsove čestice uvedene u standardni model da objasni porijeklo masa preostalih čestica standardnog modela, trebalo je izgraditi do sada najmoćniji protonski sudarivač, LHC [2] na CERN-u. Otežavajući za traženje higgasa je bio nedostatak spoznaje na kojoj vrijednosti mase bi se trebao nalaziti.

## Od inspiracije u supravodljivosti do Higgsove čarolije

Sama ideja traženja mehanizma odgovornog za mase elementarnih čestica izrasla je iz spoznaje P. W. Andersona (1963.) da se neprodiranje magnetskog polja u supravodiču (Meissnerov učinak) može objasniti lomljenjem baždarne simetrije elektromagnetizma, pri čemu foton u supravodiču dobiva masu (koja odgovara dubini prodiranja u supravodič). Na Andersona se nadovezuje niz imena, *Anderson-Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble-Weinberg*, teorijskih fizičara koji prije svega ispituju da li se analogno generiranje mase može postići za elementarne čestice u fizikalnom vakuumu. Naime, fizikalni vakuum obiluje kvantno-mehaničkim fluktuacijama, tako da bi se fizika čestica mogla opisati kao "kondenzirana tvar vakuuma". Problem kojeg pri tome susreću je pojavljivanje bezmasenog, Goldstoneovog pobuđenja, koje bi se trebalo pojaviti pri lomljenju kontinuirane simetrije (tzv. Goldstoneov teorem) [3]. Rješenje do kojeg dolaze je spoznaja da, ukoliko je spontano slomljena simetrija *lokalna*, to čini izuzetak od Goldstoneovog teorema. Nambu-Goldstoneova pobuđenja bivaju apsorbirana u longitudinalne komponente vektorskih polja lokalne simetrije, koja time postaju masivnima. Brout, Englert i Higgs pokazuju to na primjeru elektrodinamike kompleksnog skalarnog polja, složenog od dva realna polja, gdje jedno od njih bude apsorbirano u longitudinalnu komponentu vektorskog polja. Uz to, Higgs pokazuje da drugo realno polje ostaje kao opservabilna čestica spina nula.

Salam i Weinberg preuzimaju taj mehanizam za slučaj lomljenja simetrije standardnog modela, gdje uvode dublet kompleksnih skalarnih polja, koji sadrži četiri realna skalarna polja. Pri spontanom lomljenju simetrije standardnog modela, tri od četiriju Nambu-Goldstoneovih bozona pribavljaju masu  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z$  bozona, a neapsorbirano skalarno polje ostaje kao fizikalna čestica, Higgsov bozon. Jedan jedini dublet Higgsovog polja pokazuje se dostatnim da svojom "čarolijom" snabdije masama sve postojeće čestice standardnog modela (u kojemu su neutrini bezmaseni), a provjera postojanja preostale čestice spina nula, "higgasa", bio je jedan je od glavnih ciljeva pokretanja velikog hadronskog sudarivača LHC.

## Potvrda na LHC-u i otvaranje novih pitanja

Na objašnjavanju supravodljivosti proslavila se BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) teorija, na način koji se razlikuje od "redukcionističkog" pristupa u fizici elementarnih čestica. Naime, polazna točka BCS-teorije bili su kondenzati parova elektrona ("Cooperovi parovi") koji nisu neka nova čestica. S druge strane, da bi dobili konačan odgovor na predloženi mehanizam generiranja masa čestica standardnog modela, morao se nakon LEP-a i tevatrona sagraditi sudarivač još veće energije, na kojemu bi higgs kao nova čestica mogao ostaviti čitljiv potpis.

Taj potpis je na LHC-u čitan nezavisno na njegovim detektorima ATLAS i CMS [4]. Pri tome je najzanimljiviji potpis raspadom u dva fotona s "invarijantnom masom", od

otprilike 130 masa protona, koja mjeri higgs mase 126 GeV. Zajedno s potpisima ostalih kanala raspada, sva mjerenja potvrđuju da je riječ o čestici spina nula i pozitivnog pariteta, dakle o higgsu standardnog modela. Riječ je o temeljnom otkriću da osim tradicionalnih čestica tvari, kvarkova i leptonu sa spinom  $1/2$  i čestica sila sa spinom 1, postoji i polje bez spina. U hlađenju s ostatkom svemira ono je kondenziralo, kao što vodena para kondenzira u tekućinu. Pri tome, ono je kondenziralo u superfluid bez viskoznosti, kao što se to dogodi s “helijem-4” ohlađenim do 2.17 stupnjeva Kelvina. Zbog toga i ne osjećamo da se gibamo kroz to polje. Ipak, temeljne čestice tvari i čestice sila osjećaju to polje na način da iz tog kondenzata crpe svoju masu.

Naglasimo da se svemir pokazuje prirodnim laboratorijem za izučavanje Higgsovog polja. S jedne strane, polja tipa Higgsovog imaju dobra svojstva (jednadžbu stanja) za proizvodnju ubrzanog širenja svemira, ali ostaje problem da je mjerena energija vakuuma (kozmoška konstanta) 55 redova veličine ispod one koju predviđa higgs mase 126 GeV. S druge strane ta specijalna vrijednost mase higgsa govori da je današnji svemir na rubu stabilnosti vakuuma.

Posebno je zanimljivo mjerenje higgsa putem kanala raspada u dva fotona koji se odvija na razini kvantnih petlji, kojima mogu doprinosti nove nabijene čestice, nepostojeće u standardnom modelu. Potreba postojanja dodatnih čestica (među kojima su najpoznatije tzv. supersimetrične čestice) dolazi iz problema lakoće mjerenog higgsa (tzv. problem hijerarhije). S druge strane, potreba za uvođenjem novih čestica dolazi i prilikom objašnjenja lakoće neutrina, nakon što su oscilacije neutrina ukazale na postojanje malih neutrinških masa.

Takve čestice izvan standardnog modela, ukoliko su dovoljno lake, mogle bi biti u doseg LHC-a. Otkrivanje nešto težih čestica zahtijevalo bi izgradnju još moćnijeg stroja koji bi bio sljedbenik LHC-a. Sam LHC u času je u “mirovanju” i prolazi fazu nadogradnje: sudari protona bi se od 2015. godine odvijali na podvostručenoj energiji od 14 teraelektronvolta (TeV) i mogli bi dati smjernice za dizajniranje sudara u budućnosti. Krajnji je čas za odluku, imamo li u vidu da za izgradnju takve aparature treba 20 godina. Program LHC-a odobren je 1995. da bi do zamišljenih 14 TeV došao 2015. Prijedlog vrlo velikog hadronskog sudarivača VLHC (od engl. *Very Large Hadron Collider*) pošao je od ideje da se (sad već zatvoren) sudarivač Tevatron kod Chicaga, nadogradi akceleratorskim prstenom od stotinjak kilometara na stroj koji bi proizvodio sudare od 100 TeV.

Ključni za konačne odluke bit će rezultati novog kruga mjerenja na LHC-u. Ukoliko se donese odluka za sudarivač koji bi bio posvećen iscrpnom proučavanju samog higgsa, tada bi se išlo na leptonski sudarivač komplementaran LHC-u. Riječ je o ILC-u (od engl. *International Linear Collider*) s čijom bi se realizacijom započelo u skoroj budućnosti. Postoji prihvaćena studija tog projekta i spremnost Japana da ga ugosti. Supravodljive akceleratorске komore dvaju linearnih ubrzivača dovodile bi elektrone i njihove antičestice, pozitrone, do sudara energija 500 GeV u detektorima smještenim na sredini 31 kilometarskog stroja. I kod ovog projekta naglašena je međunarodna komponenta, suradnja više od tisuću znanstvenika i inženjera s preko sto sveučilišta i laboratorija iz nekoliko desetaka država. Svojim predmetom bavljenja ovi akceleratorски projekti premošćuju fiziku čestica i kozmologiju.

## Literatura

- [1] <http://nobelprize.org/>
- [2] TOME ANTIČIĆ I VUKO BRIGLJEVIĆ, *LHC: zašto mu se divimo*, Matematičko-fizički list LIX, 2008/9, 86–94.
- [3] IVICA PICEK, *Narušene simetrije – Nobelova nagrada za fiziku 2008. g.*, Matematičko-fizički list LIX, 2008/9, 208–209.
- [4] SENKA ĐURIĆ, *Otkriven Higgsov bozon?*, Matematičko-fizički list list LXIII, 2012/13, 3–5.